Dipl.-Ing. Joachim Kniestedt, Bonn

Heinrich Hertz

— Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen vor 100 Jahren —

Inhaltsübersicht

1 Einleitung

»Über Strahlen elektrischer Kraft« war der Titel des abschließenden Forschungsberichts von Heinrich Hertz, den die Berliner Akademie der Wissenschaften in ihrer Sitzung am 13. Dezember 1888 behandelte. Diesen letzten der elf bedeutenden Berichte der zweijährigen Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft an der Technischen Hochschule — der heutigen Universität Fridericiana — in Karlsruhe trug Hertz nicht selbst vor. Sein Lehrer und Förderer *Hermann von Helmholtz* legte den Bericht der Akademie vor, die ihn in ihrem Sitzungsprotokoll veröffentlichte.
Hertz bemerkte später in seinen »Gesammelten Werken« [1], daß der Ausdruck »elektrische Kraft« zu Mißverständnissen führen könnte. Besser wäre es gewesen, »elektrische Feld-Intensität« zu sagen. Gemeint ist die elektrische Feldstärke, die bei der Ausbreitung der von Hertz in den Jahren 1887/1888 entdeckten elektromagnetischen Wellen, den sogenannten Radiowellen, im freien Raum entsteht. Mit seiner Entdeckung schuf Hertz die Grundlagen für die Entwicklung der drahtlosen Nachrichtentechnik, das heißt der Funktechnik, und für die spätere Einführung des Rundfunks und Fernsehens.

Was wußten die Wissenschaftler vor über 100 Jahren über die elektrischen und magnetischen Kräfte? Welche physikalischen Erkenntnisse — chronologisch dargestellt — bildeten die Voraussetzung für die Entdeckung von Hertz, die das damalige Bild der klassischen Physik völlig veränderte. An das Leben und Werk von Hertz soll nun nach 100 Jahren erinnert werden.



Bild 1: Heinrich Hertz, im Jahre 1891 als Ordinarius der Physik an der Universität Bonn.

2 Erste Erkenntnisse über den Elektromagnetismus

Im Jahre 1820 entdeckte der dänische Physiker *Hans Christian Oerstedt* (1777 bis 1851), daß eine Magnetnadel, die sich in der Nähe eines von Elektrizität durchflossenen Drahtes befand, von der Elektrizität abgelenkt wurde. Offenbar entstand also um den von Elektrizität durchflossenen Draht ein Magnetfeld. Je stärker der Fluß der Elektrizität war, um so mehr wurde die Magnetnadel abgelenkt. *Oerstedt* hatte damit den Elektromagnetismus entdeckt. Er schuf zugleich eine Möglichkeit, die Menge der sich bewegenden Elektrizität zu messen. Wenig später kamen andere Physiker auf die Idee, den Draht mehrere Male an der Magnetnadel vorbeizuführen, um die Auslenkung der Nadel zu verstärken und die Empfindlichkeit der Meßeinrichtung zu erhöhen. Man nannte das »Multiplikator-Effekt«. *Oerstedt* hatte mit seiner Entdeckung auch einen ersten Weg für die Anwendung des Elektromagnetismus gewiesen. Die weiteren Untersuchungen über die magnetische Wirkung der fließenden Elektrizität verdanken wir dem französischen Physiker *André Marie Ampère* (1775 bis 1836). Er führte in Anlehnung an das Fließen von Flüssigkeiten den Ausdruck »Elektrischer Strom« ein und unterschied als erster deutlich zwischen diesem Strom und der »Elektrischen Spannung«. *Ampère* entdeckte, daß zwischen zwei vom elektrischen Strom durchflossenen Drähten Kräfte auftreten, weil sich um jeden dieser Drähte ein Magnetfeld bildet. Aus dieser Entdeckung entwikkelte *Ampère* seine Lehre von der Elektrodynamik, das heißt von der Wirkung der sich bewegenden Elektrizität [10].

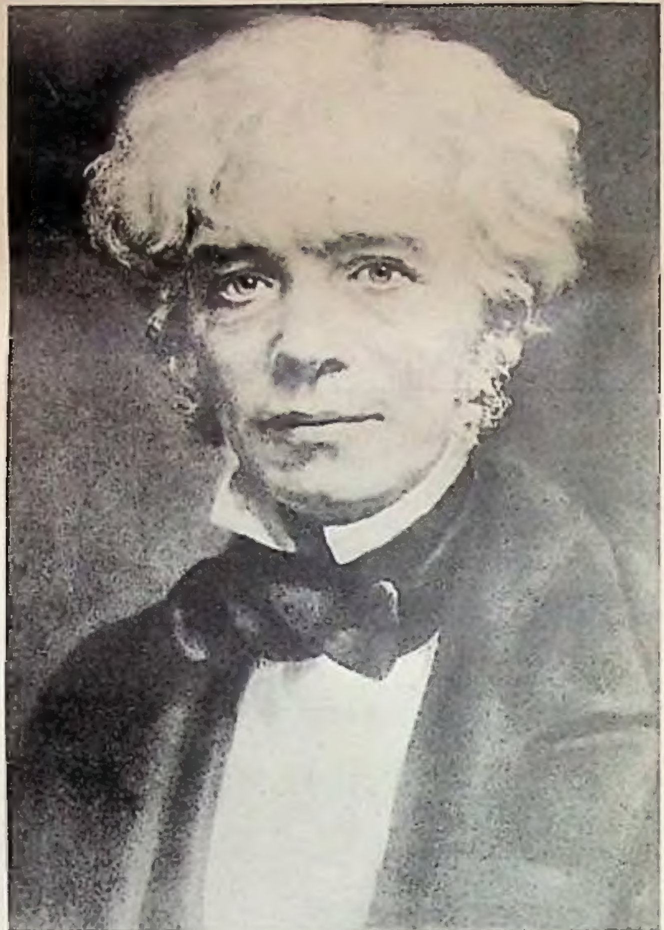


Bild 2: Michael Faraday, englischer Naturwissenschaftler (1791 bis 1867); Foto Siemens-Archiv.

3 Das elektromagnetische Feld und die elektrischen Schwingungen

3.1 Faradays Theorie des elektromagnetischen Feldes

Der Engländer *Michael Faraday* (1791 bis 1867) begann seinen beruflichen Weg mit einer Buchbinderlehre. Das Lesen von Büchern über Physik weckte sein Interesse an dieser Wissenschaft. Schon mit 23 Jahren führte er selbständig wissenschaftliche Untersuchungen bei der Royal Institution in London durch, der er sein ganzes Leben angehörte. Er wurde einer der bedeutendsten Wissenschaftler Englands.

Eine seiner ersten Erkenntnisse über die Elektrizität war, daß sie, ganz gleich wie man sie damals erzeugte, dieselbe Wirkung hervorrufen mußte. Er stellte damit fest, daß es nur *eine* Elektrizität gibt.

Bei Versuchen mit dem Elektromagnetismus stellte sich *Faraday* die Frage: Wenn ein elektrischer Strom um sich ein Magnetfeld erzeugt, müßte umgekehrt dann nicht auch ein Magnetfeld in einem Draht, der sich in dem Magnetfeld befindet, einen elektrischen Strom hervorrufen? Aber bei mehreren Versuchen mit einem konstanten Magnetfeld konnte er einen solchen Strom nicht feststellen. Durch Zufall bemerkte er jedoch, daß beim Verändern des Magnetfeldes, das auf den Draht wirkte, doch ein elektrischer Strom floß. Er hatte damit die elektromagnetische Induktion entdeckt und einen Hinweis für die Stromerzeugung gegeben.

Faraday entwickelte aus seiner Entdeckung in den Jahren 1836/1837 die Theorie des elektrischen und magnetischen Feldes. Er nahm an, daß ähnlich wie sich um die Pole eines Magneten ein Magnetfeld bildet, um elektrische Ladungen, zum Beispiel zwischen den Platten eines Kondensators, ein elektrisches Feld entstehen müßte. In Analogie zu den damals längst bekannten magnetischen Kraft- oder Feldlinien führte er den Begriff der elektrischen Kraft- oder Feldlinien ein. Sie müßten auch in Nichtleitern, insbesondere im Äther, vorhanden sein und dort magnetische Wirkungen hervorrufen, die sich durch den Raum fortpflanzten. Aber wie sollte die Wirkung der Kräfte durch den Raum vor sich gehen? Schon vor der Entdekkung von *Faraday* behaupteten Wissenschaftler in Anlehnung an das *Newtonsche Gesetz*, daß die elektrischen und magnetischen Kräfte als Fernkräfte unmittelbar, das heißt mit unendlicher Geschwindigkeit, geradlinig durch den Raum wirken und diesen überspringen würden. Dieser »Fernwirkungstheorie« stand die Theorie des elektrischen und magnetischen Feldes von *Faraday* gegenüber. Für *Faraday* war es undenkbar, daß bei solchen Wirkungen zwischen fernen Körpern in dem dazwischen liegenden Medium, zum Beispiel im Äther, keine Veränderungen auftreten sollten. Die Wissenschaftler vermochten damals der für sie schwer verständlichen Theorie von *Faraday* nicht zu folgen [10, 22].

3.2 Feddersen macht Schwingungen bei Funkenentladungen sichtbar

Eine weitere Voraussetzung für die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz war die Kenntnis der elektrischen Schwingungen. Sie entstehen, wenn in einem Strom-

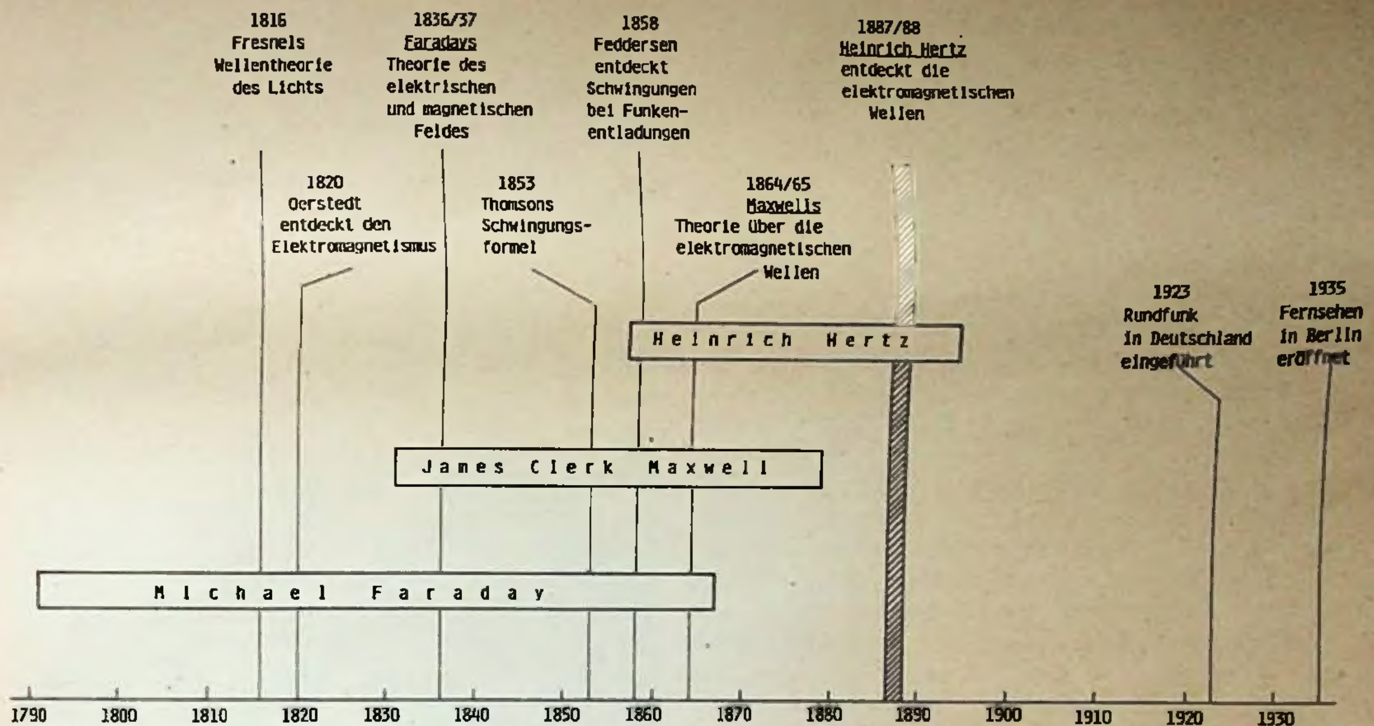


Bild 3: Lebenszeiten der Väter der elektromagnetischen Wellen und die wichtigsten Erkenntnisse bis zur Entdeckung der Wellen durch Heinrich Hertz.

kreis eine Induktivität (Spule) und eine Kapazität (Kondensator) zusammenwirken. Der englische Physiker *William Thomson*, der spätere *Lord Kelvin* (1824 bis 1907), stellte im Jahre 1853 seine Formel zur Berechnung der Frequenz der Schwingungen aus der Größe der Induktivität und der Kapazität auf.

Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894), der Lehrer von Hertz, behauptete schon im Jahre 1847, daß bei der elektrischen Entladung einer Leydener Flasche »die Elektrizität hin und her schwingen« könnte. Diese Flaschen sind eine spezielle Art von Kondensatoren, mit denen man damals Elektrizität hoher Spannung speicherte.

Aber erst dem deutschen Physiker *Wilhelm Feddersen* (1832 bis 1918) gelang es, diese Schwingungen, die wegen der hohen Frequenz normal nicht zu beobachten waren, als erster sichtbar zu machen. Er benutzte dazu die einfache Methode des rotierenden Spiegels. Er konnte damit den Schwingungsvorgang, der sich im Entladungsfunken zeitlich nacheinander abspielte, in ein räumliches Bild umwandeln und so die einzelnen Schwingungen nebeneinander darstellen. Aus diesen »Schwingungsbändern« gelang es *Feddersen*, die Frequenz der Schwingung zu berechnen. Das ergab dieselbe Frequenz wie aus der Berechnung mit der *Thomsonschen Schwingungsformel. Feddersen* hatte damit im Jahre 1858 die Richtigkeit dieser Formel bestätigt. Er gilt als Begründer der Lehre der elektrischen Schwingungen [5].

3.3 Maxwells Differentialgleichungen über die elektromagnetischen Wellen

Nachdem *Faraday* seine Theorie vom elektromagnetischen Feld aufgestellt hatte, vergingen 30 Jahre, bis es dem schottischen Mathematiker und Physiker *James Clerk Maxwell* (1831 bis 1879) gelang, die Theorie in eine mathematisch vollendete Form zu bringen. *Maxwell* war zunächst Privatgelehrter und erhielt bereits mit 25 Jahren eine Professur in Aberdeen. Später lehrte er am King's College in London. Dort entwickelte er in

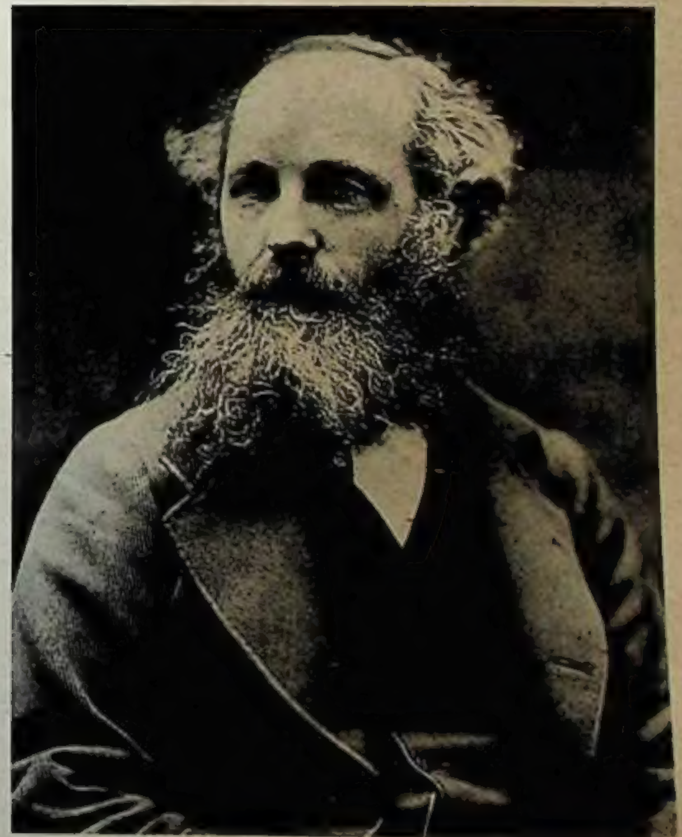


Bild 4: James Clerk Maxwell, schottischer Mathematiker und Physiker (1831 bis 1879); Foto Siemens-Archiv.

den Jahren 1864/1865 seine bedeutenden Differentialgleichungen über das Zusammenwirken des elektrischen und des magnetischen Feldes sowie die dadurch im Äther hervorgerufenen Erscheinungen. Die Linien beider Felder müßten danach senkrecht zueinander verlaufen und würden das elektromagnetische Feld ergeben.

Rein aus seiner mathematischen Analyse heraus folgerte *Maxwell*, daß sich das elektromagnetische Feld wellenartig wie das Licht im Äther ausbreiten müßte. Die Wellentheorie des Lichts hatte der französische Physiker *Augustin-Jean Fresnel* (1788 bis 1827) bereits im Jahre 1816 aufgestellt. *Maxwell* bewies mit seinen Gleichungen, daß sich die elektromagnetischen Wellen mit der Geschwindigkeit des Lichts, das heißt mit 300 000 km pro Sekunde, im freien Raum bewegen müßten. Licht sei nur eine Sonderform der elektromagnetischen Wellen mit extrem kurzer Wellenlänge, nämlich mit einem Tausendstel eines Millimeters.

Maxwell hatte mit seinen Erkenntnissen vom Jahre 1865 die Theorie von *Faraday*, der damals noch lebte, mathematisch bestätigt und die bereits erwähnte Fernwirkungstheorie widerlegt. Der Beweis, daß die von *Maxwell* vorausgesagten elektromagnetischen Wellen tatsächlich existieren, gelang Hertz erst 22 Jahre später. *Maxwell* hat diesen Erfolg nicht mehr erlebt [10].

4 Heinrich Hertz' Schulzeit und erstes Studienjahr

Heinrich Rudolf Hertz wurde am 22. Februar 1857 in Hamburg als erster Sohn des Rechtsanwalts und späteren Justizsenators der Hansestadt, Gustav Ferdinand Hertz (1827 bis 1914), geboren. Der junge Heinrich besuchte eine Privatschule. Er zeichnete sich durch eine ungewöhnliche Begabung für die Mathematik und die Naturwissenschaften, aber auch durch sein Interesse an alten Sprachen aus. Auch manuell war er sehr geschickt. Er verstand es vortrefflich, zu modellieren und zu drechseln. Mit zwölf Jahren hatte er eine Drechslerbank bekommen. Ein Drechslermeister unterrichtete ihn. Sonntags besuchte der junge Heinrich die Gewerbeschule, um geometrisches Zeichnen zu erlernen.

Die Abiturprüfung legte Hertz in der »Gelehrtenschule« des Hamburger Johanneums ab. In seinem Prüfungszeugnis heißt es: *»Er hat eine gesunde, kräftige Natur, körperlich und geistig, eine scharfe Logik und ein sicheres Gedächtnis, mit Leichtigkeit, wenn auch keine Schönheit im Ausdruck. Er ist für reales ebenso gut wie für abstraktes Denken gemacht.«* Übrigens fielen damals elf von den 23 Prüflingen durch.

Trotz der Abiturnote »sehr gut« in Mathematik wollte Hertz diese abstrakte Wissenschaft nicht studieren. Aufgrund seiner praktischen Fähigkeiten entschloß er sich, Bauingenieur oder Architekt zu werden, und er begann im Jahre 1875 ein einjähriges Praktikum in einem Konstruktionsbüro in Frankfurt am Main. Aus dieser Stadt stammte auch seine Mutter. Da ihn die Arbeit im Büro nicht ausfüllte, widmete er sich seiner Weiterbildung im Selbstunterricht. Er las altgriechische Literatur, lernte etwas Arabisch und löste Mathematikaufgaben. Er hörte auch Vorträge im Naturwissenschaftlichen Verein.

Im Jahre 1876 begann Hertz in Dresden an der Technischen Hochschule sein Studium der Ingenieurwissenschaften. Nach einem Semester leistete er seinen einjährigen Militärdienst im 1. Garde-Eisenbahn-Regiment in Berlin ab. Er bestand die Abschlußprüfung für eine spätere Berufung zum Reserveoffizier, dies obwohl die Hälfte der Bewerber durchfiel.



Bild 5: Hermann von Helmholtz (1821 bis 1894), Lehrer und Förderer von Hertz; Foto Siemens-Archiv.

Als Hertz sein Studium nach der Militärzeit in München wieder aufnehmen wollte, merkte er, daß er bei der Belegung der Vorlesungsfächer, entsprechend seinem Interesse, die Mathematik ganz in den Vordergrund gestellt und die technischen Fächer vernachlässigt hatte. Er erkannte daraus, daß die Mathematik und die Naturwissenschaften nun nach einem Studienjahr eher seinen Neigungen entsprachen und beschloß, das Studienfach zu wechseln. Wie es damals noch üblich war, teilte er seinem Vater die Gründe dafür mit und bat um die Erlaubnis für diesen Wechsel. Sein verständnisvoller Vater erlaubte ihn und damit den Übergang zur Universität München [7, 9, 16].

5 Hertz wird mit 23 Jahren Doktor der Philosophie

Nach einem Studienjahr in München wechselte Hertz im Jahre 1878 über zur Berliner Universität. Dort lehrten die berühmten Wissenschaftler *Hermann von Helmholtz*, im Jahre 1883 wurde er geadelt, und *Gustav Robert Kirchhoff*. Die beiden Gelehrten übten damals eine besondere Anziehungskraft für Studenten der Mathematik und Physik aus. *Von Helmholtz* hatte 1871 das Physikalische Institut der Universität gegründet, das er dann 17 Jahre leitete.

Von Helmholtz erkannte sehr bald die ungewöhnliche Begabung von Hertz und beschloß, ihn behutsam an die wissen-

schaftliche Arbeit heranzuführen. Er förderte Hertz sehr und übertrug ihm schon im ersten Studienjahr in Berlin eine Preisaufgabe der Philosophischen Fakultät. Es sollte untersucht werden, »ob die Elektrizität, die bei einem elektrischen Strom in einem Draht sich bewegt, eine nachweisbare Masse und damit Trägheit besitzt«. Mit anderen Worten: Es war die Frage zu beantworten, ob das Fließen eines elektrischen Stromes mit dem Transport von träger Masse verbunden ist. Der erst 22jährige Hertz konnte die Aufgabe mit sorgfältigen Untersuchungen hervorragend lösen. Er erhielt für seinen präzisen Bericht die Preismedaille. Hertz war über die hohe Bewertung seiner Arbeit sehr überrascht. Nach seiner Ansicht hatte man die Arbeit fünfmal besser beurteilt, als sie ihm bestenfalls wert schien und zehnmal besser, als er es erwartet hatte.

Noch im selben Jahr 1879 bat ihn *von Helmholtz*, eine zweite, von der Berliner Akademie der Wissenschaften gestellte Preisaufgabe zu lösen. Es sollte bewiesen werden, daß sich »das magnetische Feld eines ungeschlossenen Stromes nicht von dem eines geschlossenen Stromes unterscheide«. Mit anderen Worten: Es sollte der experimentelle Beweis der Richtigkeit der *Maxwellschen* Theorie (siehe 3.3) erbracht werden. Diese Aufgabe lehnte Hertz zunächst ab, weil ihm die damaligen Untersuchungsmöglichkeiten hierfür nicht ausreichten. Später brachte ihm die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen auch die Lösung dieser Preisaufgabe.

Hertz begann bereits im fünften Fachsemester mit den theoretischen Arbeiten für seine Dissertation mit dem Thema »Über die Induktion in rotierenden Kugeln«. Die Arbeiten dauerten nur wenige Wochen. Schon zwei Wochen danach legte er das Examen in einem würdigen Rahmen ab. Er bestand es mit dem damals an der Universität Berlin seltenen Prädikat »magna cum laude«, das heißt »mit großem Lob«. Hertz war gerade 23 Jahre alt geworden, als man ihm im März 1880 das Doktordiplom der Philosophie überreichte [7, 12].

6 Als Assistent in Berlin und Dozent in Kiel

Nach dem Doktorexamen arbeitete Hertz als Forschungs- und Vorlesungsassistent bei *von Helmholtz* in Berlin. Hertz schätzte *von Helmholtz* als Lehrer und Ratgeber sehr. In diesen zweieinhalb Jahren blieb Hertz wenig Zeit, sich mit eigenen Forschungen und schon gar nicht mit den Theorien von *Faraday* und *Maxwell* zu beschäftigen. *Von Helmholtz* war ein begeisterter Anhänger dieser Theorien und versuchte, Hertz dafür zu gewinnen, die Existenz der von *Maxwell* vorausgesagten elektromagnetischen Wellen nachzuweisen. Aber Hertz wollte damals erst seinen beruflichen Weg fortsetzen und strebte eine Professur an.

Er entschloß sich, im Jahre 1883 eine Dozentenstelle an der Universität Kiel anzunehmen. Dort habilitierte er sich im Mai dieses Jahres mit einer Arbeit »über die Glimm-Entladung«. Die in Kiel erhoffte Professorenstelle erhielt er aber nicht. Sie wurde dem um ein Jahr jüngeren *Max Planck* (1855 bis 1947) zugesprochen. Hertz bekam jedoch einen Vertrag als Privatdozent und lehrte mathematische Physik. Seine Antrittsvorlesung hielt er vor neun Professoren und nahezu 50 Studenten. In den darauffolgenden Vorlesungen waren jedoch nur noch weniger als zehn Studenten anwesend. Hertz war mit den Forschungsmöglichkeiten in Kiel nicht zufrieden. Elektrizität gab es in den Laboratorien noch nicht. Er mußte sich die Geräte zur Erzeugung der Elektrizität selbst herstellen [7].

7 Die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen in den Jahren 1887/1888

7.1 Die Professur in Karlsruhe

Im Dezember 1885 erhielt Hertz den Ruf als ordentlicher Professor für Experimentalphysik an das Polytechnikum in Karlsruhe, das ein Jahr später den Rang einer Technischen Hochschule bekam. Er nahm das Angebot an und ging nach Karlsruhe. In seiner Antrittsvorlesung am 20. April 1885 berichtete er in Anwesenheit des Kultusministers »über den Energiehaushalt der Erde«; das Thema war also schon vor 100 Jahren aktuell.

Gegenüber der unbefriedigend verlaufenen Zeit in Kiel begannen sein Leben und seine Tätigkeit in Karlsruhe etwas erfreulicher. Bereits nach einem Jahr heiratete er die Tochter eines Kollegen. Es wird berichtet, daß dieses Ereignis sich positiv auf seine wissenschaftliche Tätigkeit ausgewirkt habe. Er war ja



Bild 6: Die Technische Hochschule in Karlsruhe vor 100 Jahren, als dort Hertz die elektromagnetischen Wellen entdeckte;
Foto Stadtarchiv Karlsruhe.

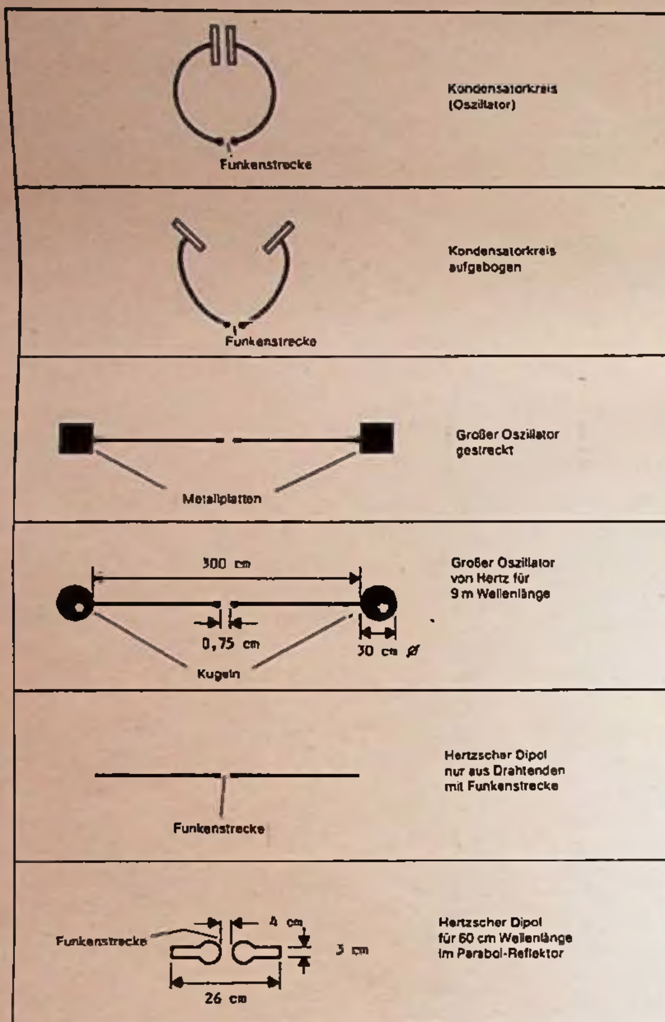


Bild 7: Aus dem Kondensatorkreis entwickelte Hertz 1887/1888 den gestreckten Dipol.

immer noch auf der Suche nach einem neuen Forschungsziel. Noch im Jahre 1878 hatte er seinen Eltern, mit denen er zeitlebens einen regen Briefwechsel unterhielt, mitgeteilt: *»Es tut mir wirklich leid, daß ich nicht 200 Jahre früher gelebt habe, wo es noch soviel Neues gab; es gibt zwar auch jetzt genug Unbekanntes, aber ich glaube nicht, daß noch jetzt leicht etwas gefunden werden kann, was so umgestaltend auf die ganze Anschauungsweise einwirken kann wie in jener Zeit, wo Teleskop und Mikroskop noch neu waren.«*

Hertz hat diese Meinung durch seine große Entdeckung in Karlsruhe auf das gründlichste widerlegt. Der Zufall kam ihm dabei zu Hilfe [7].

7.2 Erster Nachweis der elektromagnetischen Wellen

Bei einem seiner physikalischen Versuche in den Vorlesungen benutzte Hertz zwei isolierte, dicht nebeneinander liegende sogenannte Risssche oder Knochenhauersche Spiralen. Beide Spiralen waren mit einer Funkenstrecke versehen. Durch die eine Spirale schickte er den Entladungsstrom einer Leydener Flasche oder eines Induktors. Er wollte in der Funkenstrecke dieser Spirale die elektrischen Schwingungen beobachten, die *Feddersen* schon im Jahre 1858 sichtbar gemacht hatte (siehe 3.2).

Durch Zufall bemerkte Hertz, daß an der zweiten Spirale, die mit der ersten nicht verbunden war, auch winzige Funken übersprangen. Zunächst hielt Hertz diese Erscheinung für zu unregelmäßig, um sie näher zu untersuchen. Mit unserem heutigen Sprachgebrauch kann die Erscheinung leicht erklärt werden: Die erste Spirale war zum Sender und die zweite Spirale zum Empfänger von elektrischen Schwingungen geworden.

Hertz ging für seine weiteren Versuche zu einem einfacheren, aber stärkeren »Sender« für die Erzeugung von elektrischen Schwingungen über. Der Sender bestand aus zwei gesteckten Drähten mit Metallplatten und später mit Metallkugeln als Kapazität an den Enden. In der Mitte zwischen den beiden Drahtenden befand sich die Funkenstrecke. Hertz hatte damit aus dem geschlossenen Stromkreis mit Induktivität und Kapazität, in dem bekanntlich Schwingungen auftreten, durch »Aufbiegen« einen offenen Stromkreis mit weit höherer Schwingungszahl gemacht (Bild 7). Das war die Grundform des Zweipols oder Dipols, der später die Bezeichnung »Hertzscher Dipol« erhielt. Beide Drahtenden des, wie er es nannte, Großen Oszillators lud Hertz über einen Induktor auf, so daß sich Funken zwischen den Drahtenden ausbildeten.

Wieder traten an der zweiten Rissschen Spirale »Nebenfunken« auf, die, je nach Abstand dieser Spirale vom Großen Oszillator, feststellbar oder gar nicht sichtbar waren. Hertz erkannte, daß durch die Schwingungen in der ersten Funkenstrecke vom Großen Oszillator elektrische Kräfte in den Raum austreten und die Nebenfunken auslösen mußten. Aber wie konnte man diese Kräfte exakt nachweisen, die nach der Voraussage von *Maxwell* (siehe 3.3) wellenartig in den Raum ausstrahlen sollten?

Hertz baute sich für den Empfang der Wellen einen sogenannten Resonator. Das einfache Gerät bestand aus einem Drahtrechteck oder später aus einem Drahtring mit 30 cm Durchmesser. Der Draht war an einer Stelle mit einer durch eine Mikrometerschraube fein einstellbaren Unterbrechung versehen, die als Funkenstrecke diente (Bild 9). Wenn sich der Drahtring in der Nähe des Großen Oszillators befand und aufgrund seiner elektrischen Eigenschaften selbst zu Schwingungen ange-

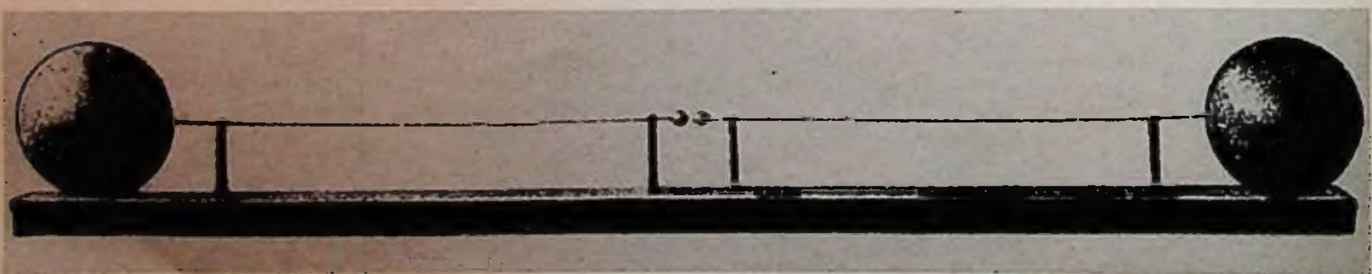


Bild 8: Sende-Dipol (Großer Oszillator) von Hertz für die 9-m-Welle mit der Funkenstrecke in der Mitte.

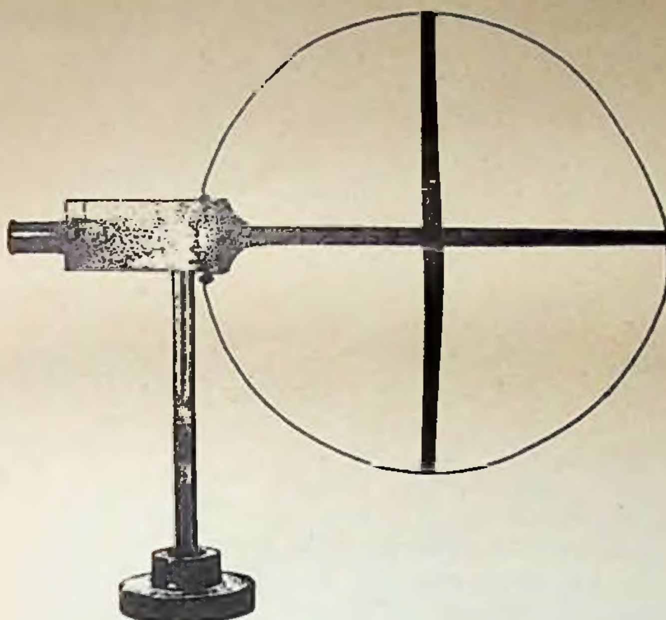


Bild 9: Drahtring (Resonator) zum Empfang der 9-m-Welle, links Mikroskop zur Beobachtung der Funkenstrecke.

regt wurde, sprangen an der Unterbrechungsstelle des Drahtes winzige Funken über. Die Bezeichnung »Resonator« erinnert daran, daß Hertz die Erscheinung der Resonanz zwischen zwei Schwingungskreisen als erster entdeckt hat. Um diesen Funken überhaupt erkennen zu können, mußte der Versuch im abgedunkelten Laboratorium durchgeführt werden. Aber auch das reichte nicht aus. Hertz mußte an der Unterbrechungsstelle des Resonators noch ein kleines Mikroskop anbringen, um die Funken sichtbar zu machen. Von den Funken wurde später der Begriff »Funktechnik« und »Rundfunk« abgeleitet. Heute weiß jedermann, daß Funken zur Erzeugung von Schwingungen und Wellen nicht mehr erforderlich sind.

Bei der Beobachtung der Funken in verschiedenem Licht stellte Hertz überraschend fest, daß die Stärke der Funken durch ultraviolettes Licht beeinflußt werden konnte. Diese Entdeckung führte später zu dem sogenannten lichtelektrischen Effekt. Sie war ein Hinweis auf die Wellen- oder Schwingungsnatur des Lichts, das den Schwingungsvorgang des Funkens beeinflußte.

Die Feineinstellung der Funkenstrecke im Resonator ermöglichte es Hertz, die Stärke der Funken und damit die Intensität der in den Raum austretenden Schwingungen zu messen und diese bis zu einer Entfernung von 10 m nachzuweisen. Er versuchte damit, die Wellennatur der Schwingungen im Raum zu erkennen und deren Länge und Ausbreitungsgeschwindigkeit zu ermitteln. Aber die Meßergebnisse dieses Versuchs wurden durch Reflexion der Wellen an den Wänden des kleinen Laboratoriums beeinflußt.

Hertz beachtete die Reflexionen zunächst nicht und kam daher zu dem falschen Schluß, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit nicht, wie von *Maxwell* vorausgesagt, mit der Lichtgeschwindigkeit übereinstimmt. Er erkannte aber bald den durch die Reflexionen ausgelösten Fehler und wollte diese dann sogar für die Ermittlung der Wellenlänge nutzen. Sofern es sich bei den ausgesendeten Schwingungen um Wellen handelte, dann müßten sich mit den reflektierten Wellen durch Interferenz stehende Wellen bilden. Diesen Effekt kannte man von akustischen Wellen her. Damit könnte der wellenartige Charakter der Schwingungen eindeutig bewiesen werden.

Für diesen Versuch war ein weit größeres Laboratorium erforderlich. Hertz gelang es, dafür den großen Hörsaal mit 14 m Länge, 15 m Breite und 6 m Höhe zu bekommen. Er ließ für die Versuche alle störenden Gaskronleuchter mit den Zuführungsrohren entfernen. Zur besseren Reflexion der Wellen brachte er an der dem Sender gegenüberliegenden Wand eine große Zinkplatte an. Zwischen dem Sender und der Platte ließ er auf Tischen einen Laufsteg errichten, auf dem er mit dem Resonator die Wellen messen wollte.

Bei dem Versuch bildeten sich, wie von Hertz erwartet, stehende Wellen aus. Wellenknoten und -maxima waren deutlich feststellbar. Aus deren Abständen konnte er eine Wellenlänge von etwa neun Metern ermitteln. Durch Vergleich mit der an einem gespannten Draht sich fortpflanzenden Welle konnte er nun feststellen, daß sich die Wellen im freien Raum doch etwa mit der Lichtgeschwindigkeit ausbreiteten.

Abhängig von der Ausrichtung des Resonators zum Großen Oszillator gelang es auch, die Richtung der magnetischen und der elektrischen Feldlinien zu bestimmen. Die magnetischen Feldlinien verliefen als Kreise um den Großen Oszillator als Mittelachse. Die elektrischen Feldlinien standen senkrecht dazu mit zylinderförmigem Verlauf nahezu parallel zur Achse des Großen Oszillators (Bild 12). Zwischen dem Verlauf der elektrischen und der magnetischen Wellen konnte Hertz, wie von *Maxwell* vorausgesagt, eine Phasenverschiebung von einem Viertel der Wellenlänge ermitteln. Hertz hatte damit die Richtigkeit der Theorien von *Faraday* und *Maxwell* bestätigt und die Existenz der sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden elektromagnetischen Wellen nachgewiesen.

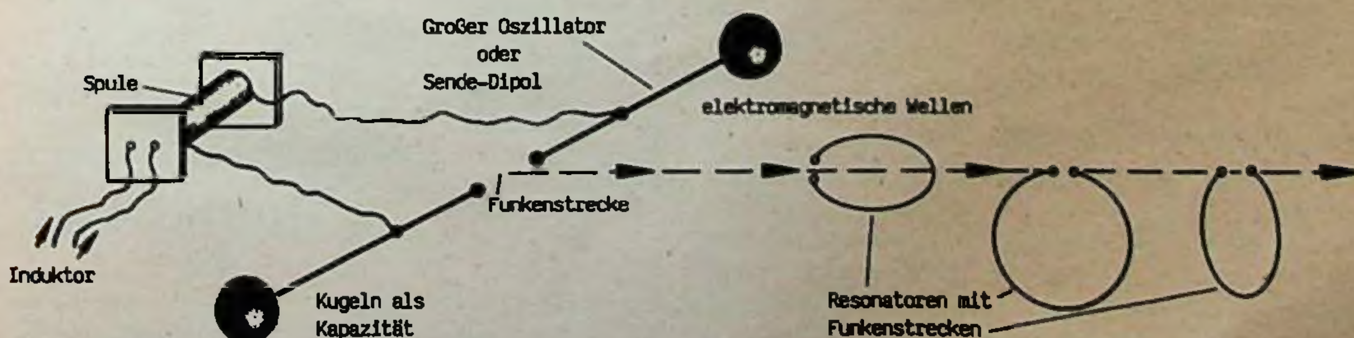


Bild 10: Mit dieser Anordnung erzeugte Hertz elektromagnetische Wellen, die er mit den Resonatoren nachweisen konnte.

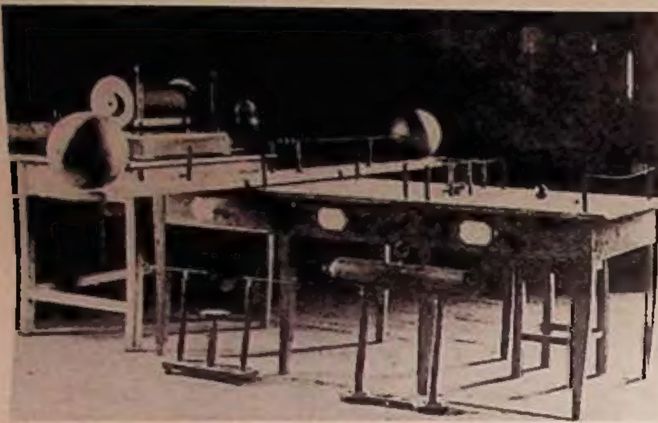


Bild 11: Original-Geräte von Hertz für die Erzeugung der elektromagnetischen Wellen in der Technischen Hochschule Karlsruhe vor 100 Jahren.

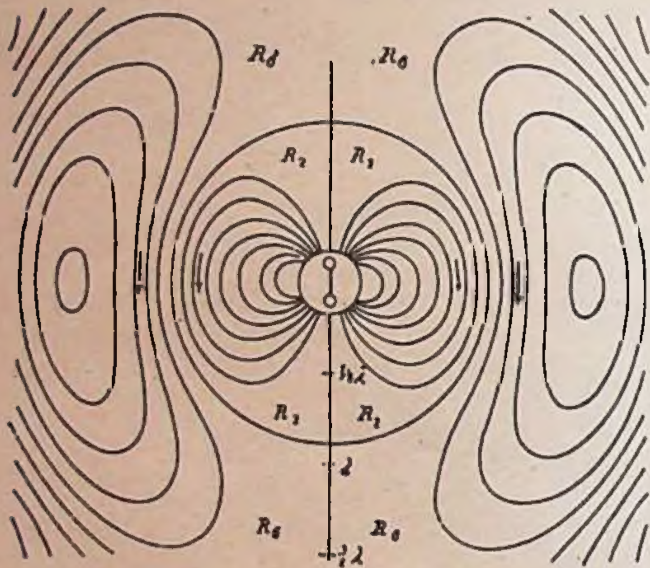


Bild 12: Elektrische Feldlinien mit Bildung der Wellen; Originalzeichnung von Hertz.

Bei den Untersuchungen konnte Hertz durch Einfügen von größeren Massen von Isolierstoffen, zum Beispiel Holz, in den Weg der Wellen auch die zweite Preisaufgabe lösen, die ihm *von Helmholtz* im Jahre 1879 gestellt hatte. Er bewies damit, daß sich die elektromagnetischen Feldlinien auch in Isolatoren ausbilden.

Von Helmholtz, dem Hertz immer über die einzelnen Phasen der gesamten Untersuchungen Berichte zugesandt hatte, war von diesen Erfolgen begeistert. Einen der bedeutenden Berichte beantwortete er im November 1887 prompt per Postkarte: *»Manuskript erhalten. Bravo!«* [7, 8]

7.3 Reflexion und Bündelung der Wellen

Hertz begnügte sich nicht allein mit dem Nachweis der Existenz der elektromagnetischen Wellen. Er wollte auch untersuchen, ob sich die Wellen nach der Voraussage von *Maxwell* wie das Licht verhalten. Die Reflexion der Wellen an der Metallwand war bereits ein Hinweis auf die Richtigkeit der Voraussage. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage für die spätere Entwicklung der Radar-Technik. Da die Wellen reflektiert werden, müßten sie sich wie das Licht eines Scheinwerfers bündeln und damit verstärken lassen. Hertz baute für diesen Versuch aus Zinkblech zwei zylindrische Parabol-Reflektoren mit einer stützenden Holzkonstruktion. Die Reflektoren waren 2 m hoch und hatten eine Öffnungsbreite von 1,5 m. In dem Brennpunkt des einen Reflektors brachte er seinen Großen Oszillator als Sender an. Der zweite Reflektor erhielt einen Empfangsdipol mit einer Drahtverbindung zu der hinter der Reflektorwand angebrachten, einstellbaren Funkenstrecke. Heute würden wir die Versuchsanordnung als eine »Richtfunkverbindung« bezeichnen.

Der erste Versuch mit dieser Anordnung schlug fehl. Die Wellen breiteten sich nach allen Seiten aus und wurden nicht gebündelt. Hertz erkannte die Ursache: Die Reflektoren waren für die Wellenlänge von etwa 9 m viel zu klein. Sie hätten mindestens zehnmal größer sein müssen. Er verkleinerte daher nach vorheriger Berechnung den Dipol des Oszillators und ließ die Kugeln an den Enden weg. Der Dipol bestand damit nur noch aus zwei Rohrteilen von 26 cm Gesamtlänge mit der kugelartigen Erweiterung in der Mitte als Funkenstrecke. Die Rohrteile waren zur Einstellung der Funkenstrecke und deren

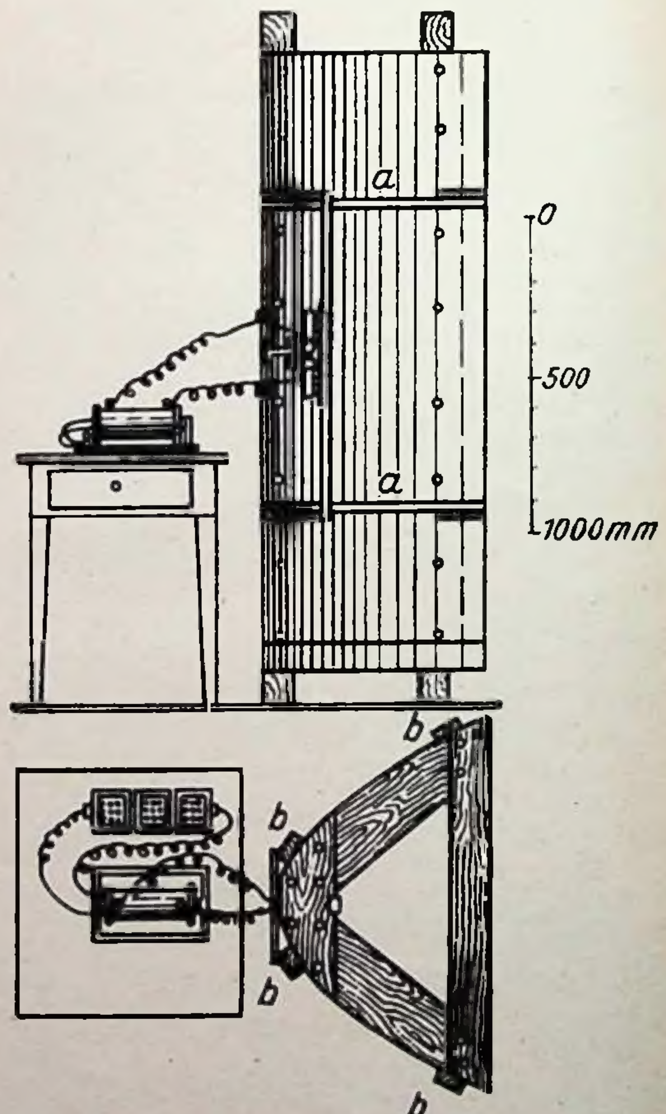


Bild 13: Parabol-Reflektor mit Sende-Dipol, Spule und Batterie; Originalzeichnung von Hertz.

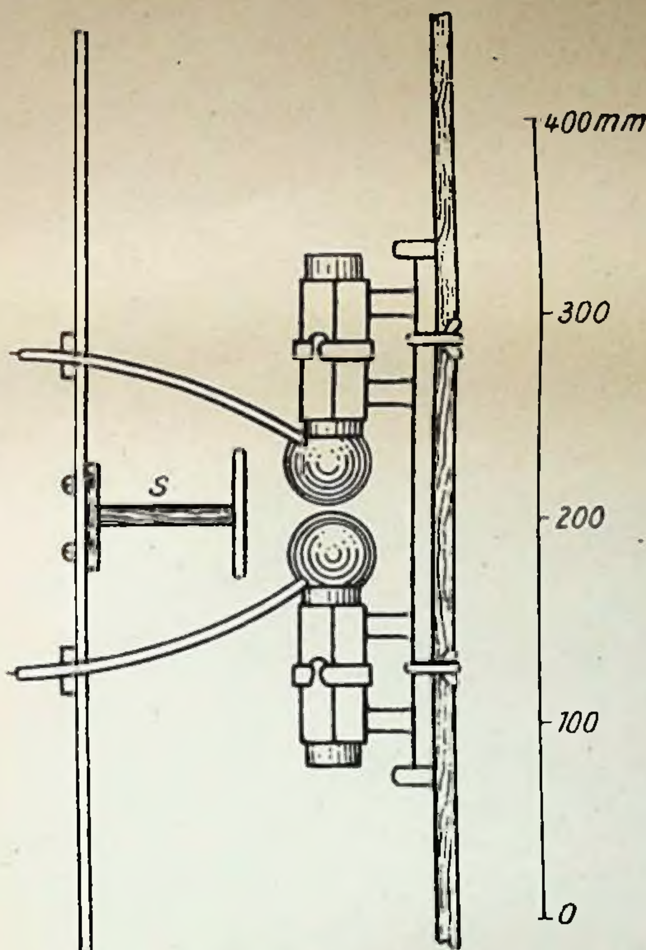


Bild 14: Sende-Dipol mit Funkenstrecke im Parabol-Reflektor, die Platte S dient als Abschirmung gegen den Reflektor; Originalzeichnung von Hertz.

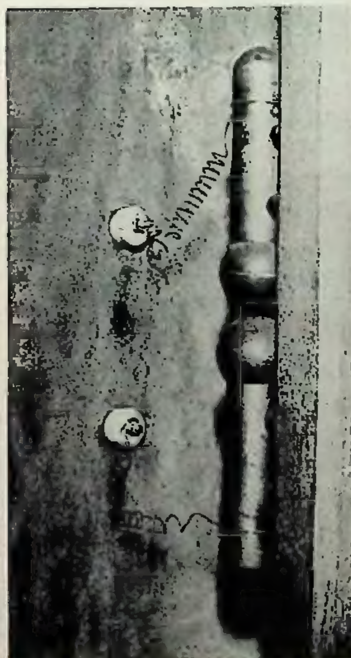


Bild 15: Sende-Dipol mit Funkenstrecke für die 60-cm-Welle, Original von Hertz in der Universität Bonn; Foto Kniestedt.

besserer Reinigung beweglich gelagert. Auch den Empfangsdipol verkürzte er beträchtlich. Hertz gelang es mit dieser Versuchsanordnung, Wellen von etwa 60 cm zu erzeugen, zu bündeln und noch in 16 m Entfernung zu empfangen. Er schätzte die Reichweite sogar auf 20 m. Ein außerhalb des gebündelten Strahls der Wellen gehaltener Resonator zeigte keine Schwingungen mehr an. Auch für den Empfang außerhalb des zweiten Parabol-Reflektors benutzte Hertz einen Dipol als Resonator. Er war zum Nachweis des elektrischen Feldes der sehr kurzen Wellen besser geeignet als der ringförmige Resonator. Ein solches, leicht selbst herzustellendes Gerät bestand aus einem Glasstreifen mit einer Metallfolie, die in der Mitte quer hauchdünn als Funkenstrecke aufgeschnitten war. Auf Glas bildeten sich bekanntlich die Funken wesentlich besser aus. Nach seinem Erfinder, dem italienischen Physiker ***Augusto Righi***, nannte man das auf die Wellenlänge abgestimmte Gerät »Righischer Resonator« (Bild 16).

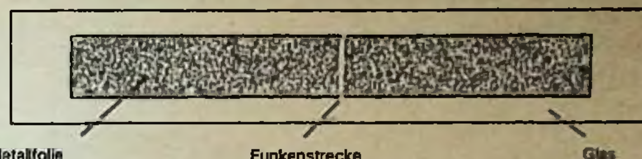


Bild 16: Righischer Resonator zum Empfang sehr kurzer Wellen.

Hertz stellte auch beide Reflektoren nebeneinander, so daß ihre Strahlrichtungen auf einem drei Meter davor liegenden Punkt im Raum gerichtet waren. Wurde der Sendedipol erregt, zeigte der Empfangsdipol bei dieser Anordnung keine Schwingungen an. Brachte man aber am Schnittpunkt der beiden Strahlrichtungen ein Metallblech an, so wurde das Wellenbündel reflektiert und im zweiten Reflektor der Empfang von Schwingungen durch Funken angezeigt. Damit war bewiesen, daß das Reflexionsgesetz der Optik, nach dem der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist, auch für die von Hertz erzeugten Wellen gilt.

7.4 Brechung und Polarisation der Wellen

Für den Nachweis der Brechung und Beugung der Wellen ließ Hertz ein großes Prisma aus Hartpech herstellen. Die Grundfläche war ein gleichschenkliges Dreieck von 1,2 m Schenkellänge mit einem brechenden Winkel von nahezu 30 Grad. Das Prisma mit einer Höhe von 1,5 m wog etwa 600 kg. Mit dem Prisma konnte Hertz nachweisen, daß die elektromagnetischen Wellen, ähnlich wie Lichtwellen, durch ein Glasprisma, gebrochen und damit abgelenkt werden. Er ermittelte einen Brechungsindex von 1,69, der dem optischen Brechungsindex des Prismamaterials zwischen 1,5 und 1,6 sehr nahe kam.
Zur Untersuchung der Polarisation der Wellen drehte Hertz den Reflektor mit dem sendenden Dipol um 90 Grad. Dann konnte der zweite Reflektor keine Wellen mehr empfangen. Um weitere Erkenntnisse über die Polarisation zu erhalten, verwendete Hertz ein Polarisationsgitter. Er nannte es Polarisator. Es bestand aus einem zwei Meter hohen und breiten achteckigen Holzrahmen, in dem parallele Kupferdrähte im Abstand von 3 cm eingespannt waren. Der Polarisator ließ nur Wellen hindurch, wenn die Drähte senkrecht zum sendenden Dipol, das heißt zur elektrischen Schwingungsebene, ausgerichtet waren. Hielt man die Drähte parallel zur Richtung des Dipols, wurden die Wellen vollständig reflektiert.

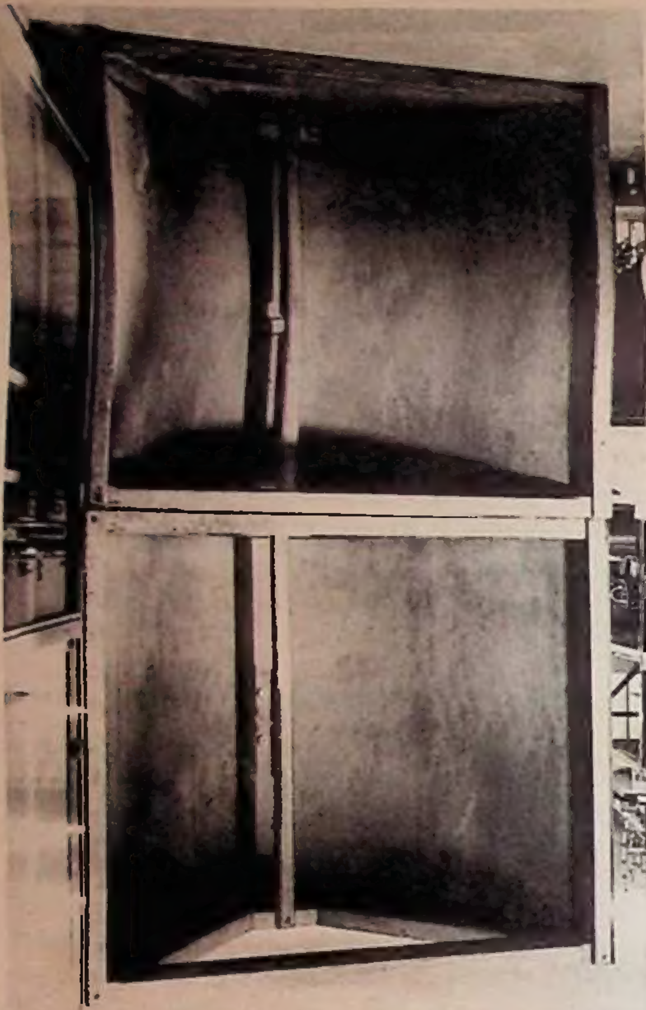


Bild 17: Zwei Parabol-Reflektoren übereinander, oben zum Senden, unten zum Empfangen, Originalgeräte von Hertz in der Universität Bonn; Foto Kniestedt.

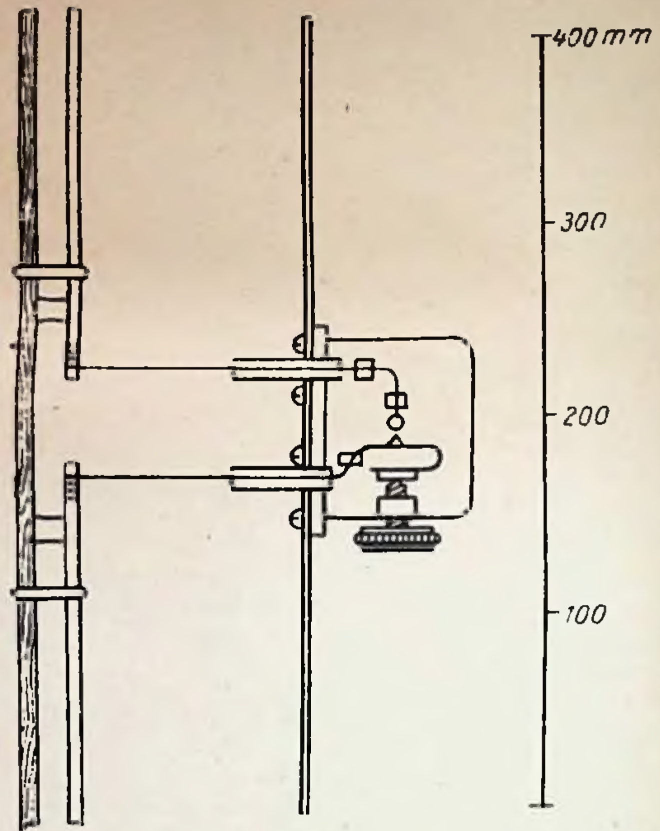


Bild 18: Empfangs-Dipol mit einstellbarer Funkenstrecke außerhalb des Reflektors; Originalzeichnung von Hertz.

Wie oben erwähnt, war bei um 90 Grad gegeneinander verdrehten Reflektoren kein Empfang der Wellen möglich. Hielt man aber den Polarisator mit den Drähten im Winkel von 45 Grad verdreht dazwischen, setzte der Empfang der Wellen wieder ein. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen erbrachten den Beweis, daß die elektrischen Wellen in Richtung des strahlenden Dipols linear polarisiert waren. Die Erkenntnisse von Hertz über das optische Verhalten der elektromagnetischen Wellen bildeten die Krönung seiner wissenschaftlichen Arbeit. Er faßte die Ergebnisse wie folgt zusammen:

»Wir haben die von uns untersuchten Gebilde als Strahlen elektrischer Kraft eingeführt. Nachträglich dürfen wir dieselben vielleicht auch als Lichtwellen von sehr großer Wellenlänge bezeichnen. Mir wenigstens erschienen die Versuche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen.«

Hertz hat das Ergebnis dieser letzten Versuche mit elektromagnetischen Wellen in seinem Bericht mit dem Titel »Über Strahlen elektrischer Kraft« zusammengefaßt, den *von Helmholtz* der Berliner Akademie der Wissenschaften in der Sitzung vom 13. Dezember 1888, also vor 100 Jahren, vorlegte [1, 7, 22].

7.5 Hohe Auszeichnungen

Hertz hatte die Existenz der elektromagnetischen Wellen und ihre Wesensgleichheit mit den Lichtwellen so eindrucksvoll bewiesen, daß die Zweifel an der Richtigkeit der *Maxwellschen* Theorie nicht mehr aufrechterhalten werden konnten. Die Fernwirkungstheorie (siehe 3.1) war damit endgültig widerlegt. Unter den Wissenschaftlern fanden die Entdeckung der Wellen und die Berichte über die Versuche sofort allgemein große Anerkennung. Der Name von Hertz war bald weltweit bekannt. Die Royal Society lud ihn zu einem Besuch nach London ein. Dort fühlte er sich durch den liebenswürdigen Empfang bei der Königin besonders geehrt. Daß er dort mit den berühmten englischen Physikern zusammentraf, bereitete ihm große Freude. Wie bereits erwähnt lebten *Faraday* und *Maxwell* damals nicht mehr. Von der Royal Society erhielt Hertz die Rumford-Medaille. Er wurde Ehrenmitglied der Cambridge Philosophical Society.

Von den Gesellschaften der Wissenschaften anderer Länder wurden ihm folgende hohe Auszeichnungen verliehen:

die Matteucci-Medaille von der italienischen Gesellschaft der Wissenschaften,

der La-Caze-Preis von der Académie des Sciences in Paris,

der Baumgartner-Preis der K.K. Akademie in Wien,

der Bressar-Preis von der Königlichen Akademie in Turin und

der Kronen-Orden von der Preußischen Regierung.

Die Akademien der Wissenschaften von Berlin, Wien, München, Rom, Turin, Bologna, Göttingen und viele andere Ge-

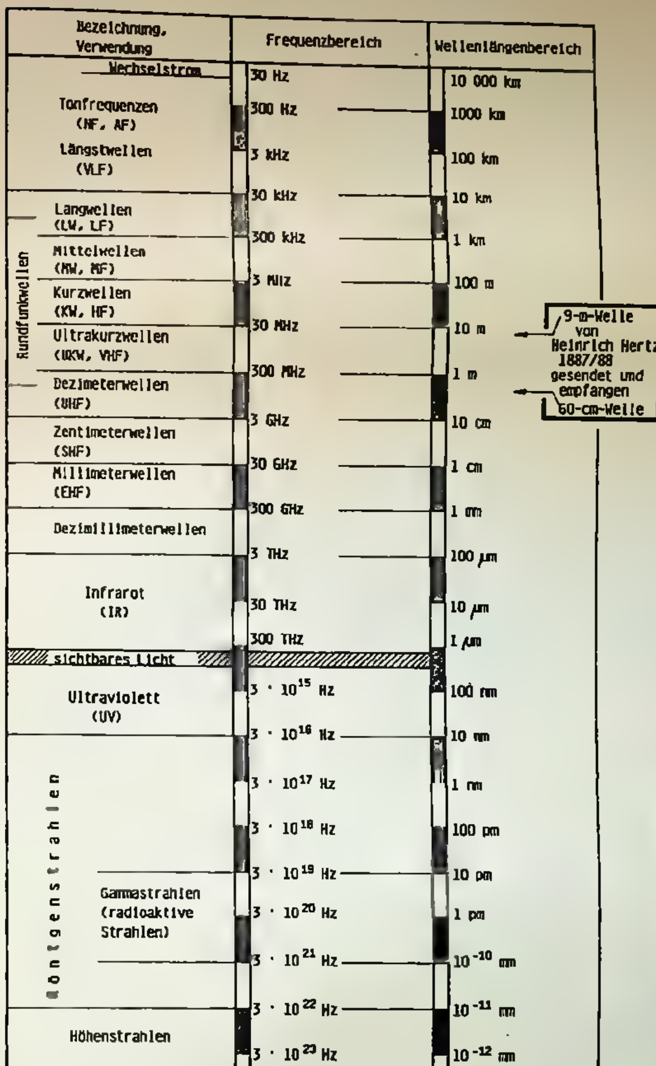


Bild 19: Spektrum der elektromagnetischen Wellen im logarithmischen Maßstab mit Angabe der von Hertz erzeugten Wellen.

lehrtengesellschaften wählten Hertz zu ihrem korrespondierenden Mitglied.

Hertz schrieb damals über die zahlreichen Ehrungen an seine Eltern: »*Ich höre freilich diese Zeit fast zuviel Angenehmes und möchte gern wieder etwas zurücktreten können, denn einen so guten Ruf, wie er mir jetzt von allen Seiten entgegentönt, zu bewahren, ist nicht leicht. Jetzt gilt es, den Sieg zu verfolgen, und das ist schwerer als der Sieg selbst, bei dem das gute Glück doch in allem Ernst eine große Rolle spielt.*« [7]

Die Universitäten Berlin, Gießen und Bonn warben um Hertz. Es wird auch berichtet, daß man ihm die Möglichkeit anbot, unter besonders günstigen Bedingungen ein neu zu gründendes Forschungsinstitut in Amerika zu übernehmen. *Von Helmholtz* schrieb für die Besetzung der Professur an der Universität Bonn ein Gutachten, in dem es unter anderem hieß: »*Für den talentvollsten und an originalen Ideen reichsten unter den jüngeren Physikern glaube ich Professor Hertz in Karlsruhe ansehen zu müssen. Seine letzten Untersuchungen über die Fortpflanzung der elektrodynamischen Wirkungen zeigen ihn als einen Kopf ersten Ranges.*« Hertz entschied sich dafür, nach Bonn zu gehen und begann dort seine Tätigkeit als Ordinarius für Physik am 1. April 1889 [20, 22].

8 Hertz' Wirken an der Universität Bonn

Persönlich hätte *von Helmholtz* den erst 32jährigen Hertz lieber an der Universität Berlin gehabt. Aber er akzeptierte Hertz' Entscheidung für Bonn und schrieb damals: »*Wer noch viel wissenschaftliche Arbeiten vor sich sieht, die er ergreifen möchte, bleibt den großen Städten fern.*« In Bonn kaufte sich Hertz in der Quantiusstraße Nr. 13 das Haus seines Vorgängers (Bild 20), *Rudolf Clausius*, der im Sommer 1888 gestorben war. *Clausius* ist bekannt als Schöpfer des Begriffes der Entropie. Der Kauf des Hauses war für Hertz erschwinglich, weil sein Jahresgehalt in Bonn mit 7 000 Mark und zusätzlichen Kolleggeldern erheblich höher lag als zuletzt in Karlsruhe mit 4 700 Mark. Angefangen hatte er dort mit 4 400 Mark Jahresgehalt.

An dem nach dem Zweiten Weltkrieg wieder aufgebauten Haus erinnert eine Gedenktafel an Heinrich Hertz, »der die Grundlagen der Funktechnik schuf« (Bild 21). Hertz bezeichnete den Zustand und die Ausrüstung des Physikalischen Instituts, dessen Leitung er übernahm, als sehr mangelhaft. Die Räume waren klein und feucht. Außerdem lagen sie zu zerstreut. Hertz mußte sogar die Gänge zwischen den Institutsräumen für seine Versuche mit der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen benutzen. Übrigens hatte er in Bonn die Ge-



Bild 20: Wohnhaus von Heinrich Hertz in Bonn, Quantiusstraße 13, von 1889 bis zu seinem Tode 1894.



Bild 21: Gedenktafel am Wohnhaus von Hertz in Bonn; Foto Kniestedt.

räte für diese Versuche nachbauen lassen und dabei selbst geholfen. Es sind dies zwei Parabol-Reflektoren mit Sende- und Empfangsdipol, zwei ringförmige Resonatoren und ein achteckiger Polarisator. Mit den gut erhaltenen historischen Geräten können die Hertzschen Versuche noch heute den Studenten vorgeführt werden. Lediglich ein modernes Meßinstrument wird statt der Empfangsfunkenstrecke benutzt, um eine empfindlichere Anzeige zu bekommen.

Das von Hertz eingerichtete Praktikum war von Anfang an gut besucht. Über seine Vorlesungen bemerkte man, daß sie einfach und klar waren für Anfänger, belehrend und anregend für Vorgebildete. Unter der Leitung von Hertz erlangte das Institut in kurzer Zeit Weltruf.

In Bonn dienten die letzten Untersuchungen der elektromagnetischen Wellen dazu, auch die Wirkung der magnetischen Kraft im Raum neben der elektrischen Kraft nachzuweisen. Hertz erzeugte hierzu stehende Wellen entlang einer Doppelleitung, der sogenannten Lecher-Leitung. Aus der Ablenkung eines kleinen Aluminiumrings konnte er die magnetische Kraft und ihre Stärke erkennen. Auch aus diesem Versuch ergab sich, daß die Maxima der magnetischen Wellen gegenüber denen der elektrischen Wellen phasenverschoben waren.

Eine bedeutende Entdeckung aus dem Bereich der »Strahlen«, die Hertz in Bonn gelang, soll hier erwähnt werden. Hertz hatte schon im Jahre 1883 Versuche mit Kathodenstrahlen vorgenommen, die aber zu einem falschen Ergebnis führten. In Bonn nahm er im Jahre 1892 die Versuche wieder auf und konnte feststellen, daß Kathodenstrahlen dünne Metallschichten durchdringen können und dabei ihre Eigenschaften nicht verlieren. Auf Anregung von Hertz hat sein Assistent *Philipp Lenard* (1862 bis 1947) diese Entdeckung zum Anlaß weiterer Forschungen genutzt und dafür im Jahre 1905 den Nobelpreis erhalten.

Eine weitere Erfindung von Hertz aus seiner Bonner Zeit soll hier ebenfalls noch genannt werden, weil sie heute bei der Verbreitung von Fernsehprogrammen über Kabel jedermann zugute kommt: Bei der Untersuchung der Fortleitung elektrischer Ströme und Wellen in Drähten verwendete er erstmals ein »Koaxialkabel«, ohne dessen spätere große Bedeutung zu erkennen. Der »Außenleiter« des selbst gefertigten Kabels hatte einen Durchmesser von 30 cm und bestand aus 24 parallel gespannten Kupferdrähten. Über das 5 m lange Kabel übertrug Hertz Wellen von 6 m Länge. Es ging dabei um den Beweis der *Maxwellschen* Behauptung, daß sich Ströme und Wellen höherer Frequenzen nur noch in der Oberfläche des Drahtes fortpflanzen. Das ist der sogenannte Skin-Effekt, den Hertz durch seine Versuche bestätigen konnte. Es vergingen 40 Jahre, bis Koaxialkabel praktisch eingesetzt wurden, und zwar für die Übertragung von Fernsehsignalen durch die Deutsche Reichspost in Berlin.

Ein Glanzpunkt des Wirkens von Hertz in seiner Bonner Zeit war ein Vortrag mit dem Thema »Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität«, den er im Jahre 1889 vor der Versammlung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in Heidelberg hielt (Bild 22). Da ihm die Vorbereitung hierzu sehr viel Mühe bereitete, bedauerte es Hertz sehr, diesen Vortragsvorschlag angenommen zu haben. Während der Vorbereitung schrieb er darüber an seine Eltern:

»Was ich herausbringe, ist dennoch meiner aufrichtigen Meinung nach für den Laien unverständlich, für den Fachmann trivial, mir selbst ekelhaft« [7].

Aber der Vortrag wurde ein großartiger Erfolg. Man bezeichnete ihn als ein immer gültiges Muster einer populären Darstellung einer schwierigen, neuen wissenschaftlichen Erkenntnis. Hertz leitete den Vortrag mit der überraschenden Behauptung ein:

»Das Licht ist eine elektrische Erscheinung, das Licht an sich, alles Licht, das Licht der Sonne, das Licht einer Kerze, das Licht eines Glühwurms. Nehmt aus der Welt die Elektrizität und das Licht verschwindet.«

Hertz erläuterte seine Versuche, mit denen er das lichtähnliche Verhalten der elektromagnetischen Wellen nachgewiesen hat. Der umgekehrte Beweis, daß das Licht elektrische Eigenschaften hat, sei noch zu erbringen. Hertz hatte hiermit in seiner Be-

Ueber die Beziehungen

zwischen

Licht und Elektricität.

Ein Vortrag

gehalten

bei der 62. Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte

in Heidelberg

1889

von

Heinrich Hertz,

weil. Professor der Physik an der Universität Bonn.

Bild 22: Titelblatt für den bedeutenden Vortrag von Hertz im Jahre 1889.

scheidenheit noch nicht zu erkennen und zu erwähnen gewagt, daß er auch diesen Beweis mit der Entdeckung des lichtelektrischen Effektes (siehe 6.) bereits geliefert hatte [2].
Übrigens traf Hertz unter den etwa 100 Gästen in Heidelberg nicht nur *von Helmholtz* und *Werner von Siemens,* sondern auch den damals weltbekannten amerikanischen Erfinder *Thomas Alva Edison* (1847 bis 1931), der ihm von eigenen Versuchen mit elektrischen Schwingungen vom Jahre 1875 erzählte. Als Hertz ihm sein Bedauern ausdrückte, daß er die Versuche nicht zu Ende geführt habe, antwortete *Edison: »Ich mache nur Erfindungen, ich treibe keine Wissenschaft!«* [8, 17].

9 Krankheit und früher Tod

Schon in Karlsruhe zu Anfang des Jahres 1888 und ein Jahr später auch in Bonn litt Hertz unter häufigen Zahnbeschwerden. Auch das Sehvermögen bereitete ihm Kummer. In seinem Tagebuch schrieb er von der »Mühe im Fixieren«. Die Krankheit breitete sich zu einer schmerzhaften Ohren- und Rachenentzündung aus. Im Oktober 1892 mußte er sich einer ersten Kieferoperation wegen eines älteren, hartnäckigen Zahngeschwürs unterziehen, die nur vorübergehend eine Besserung brachte. Im Herbst 1893 verschlechterte sich das Knochenleiden weiter, so daß er die Arbeit immer häufiger unterbrechen mußte. Am 7. Dezember 1893 hielt Hertz seine letzte Vorlesung. Zwei Tage später schrieb er an seine Eltern:
»Wenn mir wirklich etwas geschieht, so sollt Ihr nicht trauern, sondern ein wenig stolz sein und denken, daß ich dann zu den Auserwählten gehöre, die nur kurz leben, aber doch genug leben. Dies Schicksal habe ich mir nicht gewünscht und gewählt, aber wo es mich getroffen, muß ich zufrieden sein, und wenn mir die Wahl gelassen wäre, würde ich es vielleicht selbst gewählt haben.«

Am 1. Januar 1894 starb Hertz in Bonn an einer allgemeinen Blutvergiftung wenige Wochen vor seinem 37. Geburtstag. Er ist in seiner Heimatstadt Hamburg auf dem Ohlsdorfer Friedhof beigesetzt. Sein Lehrer und naher Freund, der 72jährige *von Helmholtz* sprach am Sarge von Hertz. Deutschland und die Welt hatten zu früh einen der großen Physiker verloren. Wenn es Hertz vergönnt gewesen wäre, so alt wie *von Helmholtz* zu werden, dann hätte er noch die ersten Rundfunksendungen und Bildübertragungen über »seine« Wellen erlebt [4, 13, 18, 21].

10 Gesammelte Werke und Tagebücher

Trotz der schweren Krankheit gelang es Hertz noch, seine dreibändigen Gesammelten Werke zu vollenden. Das Manuskript für den dritten Band hatte er noch kurz vor seinem Tode an den Verlag gesandt. Sein Assistent *Lenard* mußte für diesen Band das Korrekturlesen übernehmen. Er hat sich mit der Herausgabe der Gesammelten Werke im Jahre 1894 verdient gemacht. Sie gliedern sich in:

Schriften vermischten Inhalts (Erster Band)

Untersuchung über die Ausbreitung der elektrischen Kraft (Zweiter Band)

Die Prinzipien der Mechanik, in neuem Zusammenhang dargestellt (Dritter Band).

Der erste Band beginnt mit dem 36seitigen Bericht zur ersten Preisaufgabe von Jahre 1879 unter dem Titel »Versuche zur Feststellung einer oberen Grenze für die kinetische Energie der elektrischen Strömung« (siehe 5.). Es folgt die fast 100seitige Dissertation »Über die Induktion in rotierenden Kugeln«. Auch der bedeutungsvolle Vortrag vom Jahre 1889 in Heidelberg »Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität« wird wiedergegeben. Wegen der großen Nachfrage brachte ein Bonner Verlag den Vortragstext als Broschüre heraus, die innerhalb von zehn Jahren elf Auflagen erreichte. Der letzte Bericht im ersten Band behandelt die Versuche über den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten; das war übrigens die letzte experimentelle Untersuchung, die Hertz durchgeführt hat. Der erste Band schließt mit einem Beitrag von Hertz, den er zum siebzigsten Geburtstag seines Lehrers und Meisters *von Helmholtz* geschrieben hat.
Den zweiten Band »Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft« hat Hertz »seiner Exzellenz dem Wirklichen Geheimen Rathe Herrn Hermann von Helmholtz in tiefer Ehrfurcht und Dankbarkeit« gewidmet. In der Einleitung zu diesem Band erwähnt Hertz auch die Verdienste anderer Wissenschaftler, die vor ihm Versuche mit elektrischen Schwingungen durchgeführt haben. Wie *von Helmholtz* später schrieb, hat Hertz in seiner gleichbleibenden Bescheidenheit immer freudig die fremden Verdienste anerkannt. In diesem Zusammenhang sind die Untersuchungen zu nennen, die *Wilhelm von Bezold* (1837 bis 1907) eine Reihe von Jahren vor 1887 mit elektrischen Entladungen durchgeführt hat. *Von Bezold* berichtete Hertz im April 1887 bei einem Besuch in Karlsruhe darüber. Hertz war der veröffentlichte Bericht über diese Untersuchungen, die sich nicht hauptsächlich mit den Schwingungen befaßten, bis dahin nicht bekannt gewesen. Dennoch erkannte Hertz für eine ganze Reihe von Beobachtungen die äl-

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER DIE

AUSBREITUNG

DER

ELEKTRISCHEN KRAFT

VON

HEINRICH HERTZ

SEINER EXCELLENZ

DEM WIRKLICHEN GEHEIMEN RATHE

HERRN

HERMANN VON HELMHOLTZ

IN TIEFSTER EHRFURCHT UND DANKBARKEIT

GEWIDMET

VOM VERFASSER.

11. Ueber Strahlen elektrischer Kraft.

Sitzungsber. d. Berl. Akad. d. Wiss. v. 13. Dez. 1888

Bild 23: Titelblatt für Band II der Gesammelten Werke mit Widmung, unten: Bericht Nr. 11 vom 13. Dezember 1888.

teren Rechte *von Bezolds* an. Mit seiner Erlaubnis hat Hertz sogar einen Auszug aus diesem Bericht in den zweiten Band aufgenommen.

Drei der elf Berichte dieses Bandes sollen hier erwähnt werden: Der Bericht »Über einen Einfluß des ultravioletten Lichts auf die elektrische Entladung« behandelt die Entdeckung des lichtelektrischen Effekts (siehe 7.2 und 8.). Mit dem Untersuchungsergebnis »Über Induktionserscheinungen, hervorgerufen durch die elektrischen Vorgänge in Isolatoren« hatte Hertz die zweite ihm im Jahre 1879 gestellte Preisaufgabe erfüllt (siehe 5.). In dem bedeutenden Bericht »Über Strahlen elektrischer Kraft«, der am 13. Dezember 1888 veröffentlicht wurde, beschreibt Hertz die benutzten Apparate, die Erzeugung, die gradlinige Ausbreitung, die Polarisation, die Reflexion und die Brechung der Strahlen. Der Bericht enthält auch die von Hertz gefertigten Zeichnungen der Parabol-Reflektoren und der Dipole mit den Funkenstrecken (Bild 13 und 14).

Für den dritten Band »Prinzipien der Mechanik« hat *von Helmholtz* nach dem Tode von Hertz ein 16seitiges Vorwort geschrieben und darin die physikalischen Erkenntnisse, die Voraussetzung für die Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz waren, aufgeführt. Über das Werk und den Charakter von Hertz schrieb *von Helmholtz* in dem Vorwort:

»Hertz hat sich durch seine Entdeckung einen bleibenden Ruhm in der Wissenschaft gesichert. Ihm selbst war es nur um die Wahrheit zu tun, die er mit äußerstem Ernst und mit aller Anstrengung verfolgte; nie machte sich die geringste Spur von Ruhmessucht oder persönlichem Interesse bei ihm geltend.« [1]

Von Helmholtz bemühte sich auch im Jahre 1894 um eine nachträgliche öffentliche Ehrung von Hertz,

»weil die Nation ihm wohl eine Schuld zu tilgen hat, insofern Hertz während seines Lebens von deutschen Landsleuten viel weniger geehrt worden ist als vom Ausland, viel weniger jedenfalls, als es seinen Verdiensten entsprach«.

Das waren die letzten Worte, die der fast 73jährige *von Helmholtz* geschrieben hat. Einen Tag später erlitt er eine Gehirnblutung, von der er sich nicht mehr erholte. Er starb am 8. September 1894, im selben Jahr wie Hertz (17).

Eine Biographie über Hertz könnte ohne seine sorgfältig geführten Tagebücher und den Briefwechsel mit seinen Eltern und mit *von Helmholtz* nicht geschrieben werden. Seine Mutter begann sieben Jahre nach dem Tode von Hertz, die Erinnerungen aus seiner Kindheit niederzuschreiben. Im Jahre 1927 hat seine älteste Tochter, *Johanna Hertz,* diese wertvollen Dokumente zusammengefaßt und als Buch unter dem Titel »Heinrich Hertz — Erinnerungen — Briefe — Tagebücher« herausgegeben. Das Tagebuch aus der Zeit in Frankfurt am Main mußte hierzu in die normale Schrift übertragen werden, denn Hertz hatte es in Kurzschrift geschrieben [7].

11 Erste Nutzung der Hertzschen Wellen für die Nachrichtenübertragung

Hertz war zu sehr Wissenschaftler und hat daher an eine Nutzung der elektromagnetischen Wellen, die man zu seinen Ehren als »Hertzsche Wellen« bezeichnet, nie gedacht. Mit den ihm bekannten Mitteln der Funkenstrecke eines Resonators waren die Wellen nur bis höchstens 20 m Entfernung vom Sender nachweisbar. Zwar besaß der bereits erwähnte, dipolartige Righische Resonator (Bild 16) eine größere Empfindlichkeit als der ringförmige Resonator. Aber auch das reichte nicht aus. Hertz soll sogar versucht haben, mit Froschschenkel-Präparaten die Schwingungen nachzuweisen.

Im Jahre 1894 hielt der englische Physiker *Joseph Lodge* (1851 bis 1940) in London einen Vortrag über das Thema »Das Werk von Hertz und einigen seiner Nachfolger«. Aber weder *Lodge* noch irgendeiner seiner Zuhörer dachte damals an die Möglichkeit, die Wellen für die Übertragung von Signalen oder Nachrichten zu nutzen. Einer der in dem Vortrag als Nachfolger von Hertz bezeichneten Wissenschaftler war *Augusto Righi* (1850 bis 1920), Professor an der Universität in Bologna. Righi hatte in seinen Vorlesungen eine besonders wirksame Funkenstrecke aus drei Elektrodenkugeln beschrieben und damit das

Interesse des erst 21jährigen Studenten *Guglielmo Marconi* (1874 bis 1937) an den Hertzschen Wellen geweckt. Man sagt, daß nur *Righi* damit die Nutzung der Wellen direkt beeinflußt hat. *Righi* und *Marconi* verwendeten bereits zur besseren Anzeige der Schwingungen im Empfänger den sogenannten Kohärer oder Fritter, den der Franzose *Edouard Branly* (1844 bis 1940) für diesen Zweck empfohlen hatte. Der Fritter bestand aus einem mit Metallspänen gefüllten Glasrohr. Durch den Einfluß von Schwingungen hoher Frequenz wurden diese Späne leitend, wahrscheinlich durch ein nicht sichtbares »Zusammenbacken«. *Branly* nannte den Fritter »Radioinduktor«. *Marconi* konnte vom Dachboden seines elterlichen Hauses in Bologna mit seinem System Funkengeber, Fritter und Klopf-Relais bereits Reichweiten von einigen hundert Meter erzielen.

Etwa zur selben Zeit im Jahre 1895 gelang es auch dem Russen *Alexander Popow* (1858 bis 1906), Professor der Physik an der Militärakademie in Kronstadt, eine Entfernung von 250 Meter mit einem Funksignal zu überbrücken. *Popow* benutzte als erster eine geerdete Antenne für den Empfang der Wellen. In der Physikalisch-Chemischen Gesellschaft in Sankt Petersburg, dem heutigen Leningrad, führte *Popow* im Jahre 1896 seine Funkeinrichtung vor. Die ersten hiermit drahtlos und telegrafisch übermittelten Worte lauteten: »Heinrich Hertz«.

Marconi ging im Jahre 1896 nach England und wurde dort bei seinen Funkversuchen sehr gefördert. Bereits im Jahre 1899 gelang es ihm, den Ärmelkanal mit einem Funksignal zu überbrücken. Im Jahre 1901 errichtete er auf der Halbinsel Cornwall eine Sendestation. Er wollte von der Sendestation ein Funksignal nach Amerika senden. Dort hatte er auf Neufundland eine Empfangsstation aufgebaut. Am 12. Dezember 1901 erlebte er seinen großen Erfolg. Es gelang ihm, das Morsezeichen »S« (· · ·) drahtlos über die Entfernung von 3400 km aus England zu empfangen.

In Deutschland erfand *Ferdinand Braun* (1850 bis 1918), der Vorgänger von Hertz an der Universität Karlsruhe, im Jahre 1898 den abgestimmten, gekoppelten Schwingungskreis und löste mit seinem Kristalldetektor den weniger empfindlichen Fritter ab. Bereits im Jahre 1897 ließ sich *Kaiser Wilhelm II.* eine Funkverbindung mit Telegrafie über eine Entfernung von 1,6 km in Sacrow bei Potsdam von Professor *Adolf Slaby* (1849 bis 1913) und *Georg Graf von Arco* (1869 bis 1940) vorführen. Schon in den Jahren 1906/1907 wurde die Küstenfunkstelle Norddeich Radio für den Funkverkehr mit Schiffen errichtet. Zur selben Zeit begann der Bau der Großfunkstelle Nauen bei Berlin für den Überseeverkehr. Bereits im Jahre 1910 konnte der Telegrafenverkehr nach Nordamerika regelmäßig über Funkverbindungen abgewickelt werden.

Weitere bedeutende Schritte der Nutzung der Hertzschen Wellen sind die Einführung des Rundfunks durch die Deutsche Reichspost im Jahre 1923, der Beginn des Fernsehens in Berlin im Jahre 1935 und die erste Übertragung eines Fernsehsignals über einen Satelliten von den USA nach Europa im Jahre 1962 [3, 4, 14, 19].

12 Würdigung der Hertzschen Entdeckung

Im Jahre 1927, in dem Hertz 70 Jahre alt geworden wäre, haben auf Anregung des damaligen Rundfunk-Kommissars im Reichspostministerium, *Hans Bredow*, die Deutsche Reichspost, das Preußische Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung, die Reichs-Rundfunk-Gesellschaft, die Technische Hochschule in Berlin, die Großfirmen der Elektroindustrie und der Verband Deutscher Elektrotechniker die »Studiengesellschaft für Schwingungsforschung« gegründet. Zur Förderung dieser Forschung errichtete die Gesellschaft an der Technischen Hochschule Berlin ein Institut, das zu Ehren des Entdeckers der elektromagnetischen Wellen den Namen »Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung« erhielt [15].

In Hamburg, der Heimatstadt von Hertz, wurde im Jahre 1924 die »Heinrich-Hertz-Gesellschaft zur Förderung des Funkwesens« gegründet. In dieser Stadt befand sich auch das älteste Heinrich-Hertz-Gymnasium, das schon im Jahre 1906 auf diese Weise den großen Sohn der Hansestadt ehrte. Damals lebte der Vater von Hertz noch. Er hat die Namensgebung ausdrücklich gebilligt. Heute trägt den Namen eine andere Schule in Hamburg. Das Bonner Heinrich-Hertz-Gymnasium erhielt seinen Namen erst im Jahre 1961.

Noch im ersten Jahrzehnt des Rundfunks war es üblich, die Sender durch die Wellenangabe in Meter und nicht durch die Frequenzangabe zu kennzeichnen. Die Maßeinheit für die Frequenz »Schwingungen pro Sekunde« wurde wenig benutzt. Im Jahr 1930 beantragte die deutsche Delegation auf der 7. Vollversammlung der International Electric Commission (IEC), als physikalische Einheit für die Frequenz die Bezeichnung



Bild 24: Büste von Hertz im Ehrenhof der Universität Karlsruhe, geschaffen von seiner Tochter Mathilde; Foto Stadtarchiv Karlsruhe.

»Hertz« einzuführen. Der Vorschlag ging vermutlich von der Heinrich-Hertz-Gesellschaft in Hamburg aus. Der Antrag fand zunächst nicht die erforderliche Unterstützung. Als der Antrag auf der 8. Vollversammlung im Oktober 1935 erneut eingebracht wurde, einigte man sich auf einen Kompromiß. Die Kommission empfahl, die Abkürzung »Hz« anstatt »Hertz« als physikalische Einheit für die Frequenz einzuführen. Auf den Skalen der Rundfunkempfänger werden seitdem die Frequenzen der Sender zum Beispiel in Kilohertz (kHz) oder Megahertz (MHz) angegeben. Das »kHz« löste auch die im Ausland damals übliche Bezeichnung »kc/s« (kilocycles per second) bald ab [22].

Im Jahre 1957, als sich der Geburtstag von Hertz zum hundertsten Male jährte, veranstaltete der Bundesminister für das Post- und Fernmeldewesen zusammen mit der Universität Fridericiana Karlsruhe eine Gedenkfeier. Der damalige Bundesminister *Ernst Lemmer* würdigte in seiner Rede die großen Verdienste von Hertz, der die Grundlagen der Funktechnik geschaffen hatte. Die Deutsche Bundespost brachte damals eine Gedenkmarke mit dem Porträt von Hertz heraus [15]. Die Universität Fridericiana hatte bereits aus Anlaß ihres hundertjährigen Bestehens — sie ist die älteste Technische Hochschule Deutschlands — im Oktober 1925 in ihrem Ehrenhof eine lebensgroße Büste von Hertz enthüllt (Bild 24), die von Hertz' jüngster Tochter Mathilde geschaffene Büste trägt die Inschrift: *»An dieser Stätte entdeckte Heinrich Hertz die elektromagnetischen Wellen in den Jahren 1885 bis 1889«.*

Die Festansprache bei der Enthüllung des Denkmals hielt *Hans Bredow,* damals noch Staatssekretär im Reichspostministerium [6]. Im Rahmen der Feierlichkeiten tagte auch die Heinrich-Hertz-Gesellschaft zur Förderung des Funkwesens in Karlsruhe. Eine Hertz-Büste wurde übrigens auch auf der Berliner Funkausstellung 1928 in Gegenwart der Witwe *Elisabeth Hertz* enthüllt (Bild 25).

Auch an den Universitäten Bonn [17] und Hamburg fanden im Jahre 1957 Gedenkfeiern für Hertz statt. In Hamburg hielt der Neffe von Hertz, der Nobelpreisträger der Physik, Professor *Gustav Hertz,* die Gedenkrede [16]. Sein Neffe, Professor *Gerhard Hertz,* lehrt heute an der Universität Fridericiana Karlsruhe. Aus Anlaß ihres 150jährigen Bestehens stiftete die Universität Fridericiana zusammen mit dem Badenwerk im Jahr 1975 den Heinrich-Hertz-Preis und die goldene Heinrich-Hertz-Medaille, die alle drei Jahre für hervorragende Leistungen auf dem Gebiet der Erzeugung, Verteilung und Anwendung elektrischer Energie verliehen werden.

Zum 100. Jahrestag der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz veranstaltete die Stadt Karlsruhe gemeinsam mit der Universität Fridericiana ein umfangreiches Jubiläumsprogramm mit einer Ausstellung, in der unter den nahezu 400 Exponaten auch die von Hertz bei seinen Versuchen benutzten Geräte im Original gezeigt wurden. Diese Geräte waren im Jahr 1913 an das Deutsche Museum in München abgegeben worden. Um den Besuchern der Ausstellung »100 Jahre Radiowellen« die komplizierten wissenschaftlichen Zusammenhänge der Entdeckung der Wellen anschaulich zu machen, wurden kurze Szenen mit kostümierten Schauspielern als Hertz und Institutsmechaniker *Amann* gespielt [22].

Für die Geräte, die Hertz bei seinen Versuchen benutzt hatte, oder für Duplikate davon interessierten sich auch andere Institute. Das Deutsche Museum ließ daher Ende der 20er Jahre drei Duplikate der Geräte anfertigen. Sie waren für das Science Museum in London, für die Weltausstellung in Chicago im Jahre 1933 und für Berlin — wohl für die Reichs-Rundfunk-Gesellschaft — bestimmt. Die Geräte in London und zum Teil auch die Geräte in Chicago sind noch vorhanden [23]. Daß auch Originalgeräte von Hertz in der Universität Bonn noch vorhanden sind, wurde bereits erwähnt [17].



Bild 25: Hertz-Gedenkfeier anläßlich der Berliner Funkausstellung 1928; neben der Büste Rundfunk-Kommissar Hans Bredow, sitzend: Nobelpreisträger Gustav Hertz und Frau Ellen, Witwe Elisabeth Hertz, Tochter Mathilde Hertz; Foto Deutsches Rundfunkarchiv.

Der 100. Jahrestag der Hertzschen Entdeckung war auch der Anlaß für ein Symposium, das am 14./15. März 1988 in Karlsruhe stattfand. Auf Einladung des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (VDE) unter anderem mit der Universität Karlsruhe und mit Unterstützung ausländischer Institutionen der Elektrotechnik haben auf diesem Symposium herausragende Persönlichkeiten wissenschaftliche Vorträge über die Hertzsche Entdeckung und die 100 Jahre der weiteren Erforschung der Nutzung der Wellen gehalten [24]. Auch das amerikanische Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, veranstaltete 1988 ein internationales Symposium aus Anlaß des 100. Jahrestages der Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Hertz [23].

In der Reihe der Würdigungen des Werkes von Hertz ist auch die Namensgebung für den Fernsehturm in seiner Vaterstadt Hamburg zu nennen. Die Deutsche Bundespost taufte den im Jahre 1968 eingeweihten Turm auf den Namen »Heinrich-Hertz-Turm«. Viele Wissenschaftler haben dem Werk von Hertz höchste Anerkennung gezollt und wiederholt an seine bedeutende Entdeckung erinnert. So sagte der Physiker und Nobelpreisträger *Albert Einstein* in seiner Festrede zur Eröffnung der 7. Großen Deutschen Funkausstellung in Berlin im Jahre 1930:

»Wenn Ihr den Rundfunk hört, so denkt daran, wie die Menschen in den Besitz dieses wunderbaren Werkzeuges der Mitteilungen gekommen sind. Denkt an Maxwell, der die Existenz elektrischer Wellen auf magnetischem Wege aufzeigte, an Hertz, der sie zuerst mit Hilfe des Funkens erzeugte und nachwies.«

Schrifttumshinweise

[1] H. Hertz: Gesammelte Werke
Band I: Schriften gemischten Inhalts,
Band II: Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft,
Band III: Die Prinzipien der Mechanik in neuem Zusammenhang dargestellt, Leipzig, 1894.

[2] H. Hertz: Über die Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität, Bonn, 1900.

[3] J. Zenneck: Elektromagnetische Schwingungen und Drahtlose Telegraphie, Stuttgart, 1906.

[4] O. Jentsch: Der deutsche Anteil an der Entwicklung der Drahtlosen Telegraphie, in: Elektrotechnische Zeitschrift, 1911, S. 25 ff.

[5] Th. des Coudres: Wilhelm Feddersen, Reihe: Deutsche Pioniere der drahtlosen Telegraphie, in: Der deutsche Rundfunk, 1924, S. 3 ff.

[6] Die Einweihung des Heinrich-Hertz-Denkmals, in: Der deutsche Rundfunk, 1925, S. 2897 f.

[7] Johanna Hertz: Heinrich Hertz, Erinnerungen, Briefe, Tagebücher, Leipzig, 1927, neu aufgelegt von Mathilde Hertz zusammen mit Charles Süsskind, Physik Verlag Weinheim, 1977.

[8] J. Zenneck: Heinrich Hertz, Rede bei der Heinrich-Hertz-Feier der Universität Bonn am 19. November 1927, Leipzig, 1927.

[9] J. Boehmer: Pfadfinder des Funkwesens, Heinrich Hertz, Funk, Heft 9, 1927, S. 71 f.

[10] Ph. Lenard: Große Naturforscher, Geschichte der Naturforschung in Lebensbeschreibungen, München, 1929.

[11] Die Entdeckung der elektrischen Wellen, in: Elektrotechnische Zeitschrift, 1938, S. 1233.

[12] G. Lamperiello: Das Werk von Heinrich Hertz, Arbeitsgemeinschaft der Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 43, Köln, 1955.

[13] Max von Laue: Heinrich Hertz, in: *Die großen Deutschen*, Deutsche Biographie, herausgegeben von H. Heimpel, Th. Heuss, B. Reifenberg, Ullstein, Berlin, 1956.

[14] H. Bredow: Im Banne der Ätherwellen, Mundus-Verlag, Stuttgart, 1956.

[15] Heinrich-Hertz-Gedenkfeier, veranstaltet vom Bundesminister für das Post- und Fernmeldewesen und vom Rektor und Senat der Technischen Hochschule Karlsruhe, in: Zeitschrift für das Post- und Fernmeldewesen (ZPF), 1957, Heft 6, S. 185 ff.

[16] H. Wenke: Heinrich Hertz, sein Lebenswerk und seine Persönlichkeit; Gustav Hertz: Die Entdeckungen von Heinrich Hertz und ihre Auswirkungen, in: Gedenkfeier aus Anlaß des 100. Geburtstages von Heinrich Hertz in der Musikhalle am 24. Februar 1957, Hamburg, 1957.

[17] M. Steiner/W. Gerlach/W. Paul: In Memoriam Heinrich Hertz, in: Alma Mater, Beiträge zur Geschichte der Universität Bonn, Heft 7, 1958.

[18] H. Hartmann: Triumpf der Idee, Schöpfer des neuen Weltbildes, Union-Verlag Stuttgart, 1959.

[19] W. M. Dalton: The Story of Radio, Part I: How it began, London, 1975.

[20] J. Kuczera: Heinrich Hertz, Entdecker der Radiowellen, Leipzig, 1975.

[21] W. Gerlach: Heinrich Hertz, in: Männer der Funktechnik, herausgegeben von S. v. Weiher, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, 1983.

[22] Gerhard Hertz/H. Friedburg/K.-P. Hoepke/H. J. Klein: 100 Jahre Entdeckung der elektromagnetischen Wellen durch Heinrich Hertz in Karlsruhe, Fridericiana, Zeitschrift der Universität Karlsruhe, Heft 41, 1988.

[23] J. H. Bryant: Heinrich Hertz, The Beginning of Microwaves, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1988.

[24] Gerhard Hertz: Heinrich Hertz, sein Leben und Werk; J. G. O'Hara: The career of Heinrich Hertz and the state of the exact sciences in imperial Germany, in: Heinrich-Hertz-Symposium, 100 Jahre elektromagnetische Wellen, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, 1988.